

环境经济研究进展

第六卷

PROGRESS ON
ENVIRONMENTAL ECONOMICS

中国环境科学学会环境经济学分会

秦昌波 葛察忠 李红祥 李晓亮 主编

中国环境科学出版社

环境经济研究进展

PROGRESS ON ENVIRONMENTAL ECONOMICS

(第六卷)

中国环境科学学会环境经济学分会

秦昌波 葛察忠 李红祥 李晓亮 主编

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

环境经济研究进展. 第 6 卷/秦昌波等主编. —北京:
中国环境科学出版社, 2012.12

ISBN 978-7-5111-1165-4

I. ①环… II. ①秦… III. ①环境经济学—文集
IV. ①X196-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 241651 号

责任编辑 陈金华
责任校对 唐丽虹
封面设计 玄石至上

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67113412 (教材图书出版中心)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)
印装质量热线: 010-67113404

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2012 年 12 月第 1 版
印 次 2012 年 12 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 13.5
字 数 340 千字
定 价 45.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

总 序

作为中国环境科学学会的分支机构,环境经济学专业委员会在环境保护部、中国环境科学学会的指导下,第一届委员会于2003年12月正式成立,挂靠在环境保护部环境规划院。2008年,环境经济学专业委员会调整更名为环境经济学会,成立第二届委员会。环境经济学会的成立,为政府机构、环境科技、环境教育、环境管理工作者在环境经济领域的交流与合作搭建了一座良好的平台,为中国的环境经济学发展起到了有效的促进作用。

环境经济学的研究在中国已经有近30年的历史,并取得了丰硕的研究和实践成果。近6年来,环境经济学会与相关单位开展了不同层面的环境经济与政策学术活动,举办了若干次环境经济学术国际研讨会,与美国、欧洲、日本等环境与资源经济学协会开展了学术交流,分会委员们发表和出版了许多环境经济论文和专著,有力地推进了中国环境经济学的学科发展。从2007年开始,环境经济学会结合国家环境经济政策项目,与环境保护部环境规划院和《环境经济》杂志社联合开办了《中国环境经济》网页(<http://www.csfee.org.cn>),充分发挥了环境经济学会的平台辐射作用。2008年,中国环境科学学会环境经济学会又委托浙江大学等单位,开展了全国环境经济学学科发展调查。

为了进一步推动中国环境经济学的发展,克服环境经济学会近期难以创办学术期刊的局面,环境经济学会理事会决定从2008年开始,不定期出版《环境经济研究进展》,展示中国环境经济学研究的最新发展和趋势,交流中国环境经济学研究和实践成果。我们希望《环境经济研究进展》成为传播中国环境经济学动态的载体,沟通环境经济信息的平台。为此,希望环境经济学会全体委员以及关心环境经济学研究的各界人士积极投稿,一起办好《环境经济研究进展》,为推动中国环境经济学的学术发展和政策应用添砖加瓦。

王金南 主任委员
中国环境科学学会环境经济学会

序 言

环境经济政策是指按照市场经济规律的要求，运用价格、税收、财政、信贷、收费、保险等经济手段，影响市场主体行为的政策手段。环境经济政策是以内化环境行为的外部性为原则，对各类市场主体进行基于环境资源利益的调整，从而建立、保护和可持续利用环境资源的激励和约束机制。环境经济政策体系是解决环境问题最有效、最能形成长效机制的办法，是宏观经济手段的重要组成部分，更是落实科学发展观的制度支撑。

“十一五”以来，环境经济政策体系建设受到国家高度重视，环境经济政策试点探索全面铺开，国家出台了大量的绿色信贷、环境财政、生态补偿等环境经济政策，这些环境经济政策在国家的节能减排中发挥了重要作用，环境经济政策在环境政策体系中的地位不断上升。不少地方也积极结合当地的环境保护工作需要，大力开展生态补偿、绿色信贷、环境责任险等政策的试点探索，并积累了很多很好的经验。与此同时，环境经济学学科建设也取得了很大的进展，不少学校新增了环境经济学硕士点和博士点；环境经济学研究也取得了很大的突破，国家科研立项项目逐年增多，科研论文发表的水平 and 数量逐年提升，环境经济学研究的国际化水平也在逐步提高。环境经济学研究也为环境经济政策的制定和实施提供了重要支持。

2011 年是“十二五”环境保护工作的起始之年，“十二五”期间节能减排压力进一步加大，对环境经济政策的创新和应用提出了更高的要求 and 更大的需求。中国环境科学学会环境经济学分会联合中国环境规划院、福建师范大学于 2011 年 12 月 15 日至 16 日在福建武夷山召开了中国环境科学学会环境经济学分会 2011 年学术年会，会议的主题为“十一五”环境经济政策：进展

和展望。国内有关专家学者就“十一五”时期环境税费、生态补偿、排污交易等政策的实践进展、环境经济学学科发展、环境经济学研究理论与方法等问题进行交流与讨论。我们将会议论文进行了整理,编辑成《环境经济研究进展》(第五、六卷)出版。希望《环境经济研究进展》(第五、六卷)的出版,不仅评估和总结“十一五”时期环境经济学和环境经济政策研究的进展、分析存在的问题和取得的经验,也为我国“十二五”时期环境经济政策制定和试点,以及环境经济学学科建设提供思路 and 参考。

本书编委会

目 录

第一篇 环境经济理论与方法

城市发展与城市环境污染关系的计量研究	3
城市环境竞争力横向比较分析——基于广东省的实证	12
低碳交通运输困局及其破解——兼以中国为例	20
基于 LMDI 的结构调整对 CO ₂ 减排的贡献度研究	26
基于三重螺旋模型的绿色技术创新主体问题研究	36
基于 Kaya 模型的中国碳排放驱动因子分析	44
生态文明视野下的中国环境竞争力问题探析	54
资源环境国际流量的识别及测算思路	65
地方环境经济政策实践：“十一五”成果	75

第二篇 环保投融资和环境财政政策

促进环保产业发展的财政资金政策实践与展望	87
绩效导向型的中央财政专项资金分配机制改革实践与经验启示	94
我国环保投资统计核算研究中若干关键问题解析	101
我国流域治理机制创新的目标模式与政策含义——以闽江流域为例	108

第三篇 环境税费政策

环境保护视角下我国绿色税收体系的构建	119
循环经济条件下资源环境价格的表现与创建	126
构建内外一体化“环境与贸易”政策体系 ——对 WTO 原材料案专家组裁决结果的反思	133

第四篇 生态补偿

丹江口库区可持续发展与生态补偿机制创新	143
复合型生态补偿机制构建研究——以河源市为例	149
辽宁省跨界饮用水水源生态补偿制度研究	157

论太湖流域生态补偿机制存在的环境监测“瓶颈”	165
长江上游禁止开发区实施生态补偿的环境善治模式研究.....	170

第五篇 排污交易

区域性碳交易市场构建路径与交易机制研究——以重庆为例	181
削减家庭直接碳排放的干预政策及其实施效应——发达国家的相关实验研究述评.....	189
广东建立碳排放权交易市场的若干核心机制设计.....	198

第一篇

环境经济理论与方法

-
- ◆ 城市发展与城市环境污染关系的计量研究
 - ◆ 城市环境竞争力横向比较分析——基于广东省的实证
 - ◆ 低碳交通运输困局及其破解——兼以中国为例
 - ◆ 基于 LMDI 的结构调整对 CO₂ 减排的贡献度研究
 - ◆ 基于三重螺旋模型的绿色技术创新主体问题研究
 - ◆ 基于 Kaya 模型的中国碳排放驱动因子分析
 - ◆ 生态文明视野下的中国环境竞争力问题探析
 - ◆ 资源环境国际流量的识别及测算思路
 - ◆ 地方环境经济政策实践：“十一五”成果
-

城市发展与环境环境污染关系的计量研究^①

Quantitative Study of Urban Development and Urban Environmental Pollution

刘 驰^{1,2} 陈祖海¹

(1. 中南民族大学经济学院, 武汉 430074;

2. 武汉大学经济与管理学院, 人口·资源·环境经济研究中心, 武汉 430072)

[摘 要] 根据武汉市城市发展的相关数据, 应用因子分析方法对城市发展水平进行综合测算, 构建了城市发展综合指数, 运用回归模型对城市发展综合指数和工业“三废”分别进行耦合分析并建模, 探究武汉市城市发展对城市环境的影响。基于研究结果分析, 提出促进武汉市城市经济与环境协调发展的对策建议。

[关键词] 武汉市 因子分析 城市发展 环境污染

Abstract Based on the data of Wuhan city, an urban development composite index was structured by factor analysis methods. Then urban development composite index and the industrial “three wastes” are coupled respectively through regression models, in order to explore the impacts of Wuhan city development on urban environment. According to the analysis, countermeasures and suggestions are put forward to promoting the coordinated development of economy and environment of Wuhan city.

Keywords Wuhan city, Factor analysis, Urban development, Environment pollution

城市化是人口向城市聚集、城市规模扩大, 经济增长集中以及由此引起一系列社会经济变化的过程, 通常用城市人口比重指标或者非农业人口比重指标来表示, 这一指标被称为城市化率。但是, 城市化是一个非常复杂的经济社会过程, 城市化的内涵应包括城市人口比重不断提高、人口空间布局的改变、产业结构的转变、居民收入和消费水平不断提高、城市文明不断发展、人口素质的提高, 等等。城市化内涵的复杂性, 使得传统的单一指标测量方法已经难以全面反映城市化水平及其变动, 由此催生了复合指标测量方法在城市化研究中的应用。张耕田^[8]、李振福^[9]、丁刚^[10]运用不同的模型对城市化水平进行预测。刘志刚^[11]、张思锋^[12]运用层次分析法对城市化水平测度进行

① 基金项目: 2011 国家软科学研究计划项目 (2011GXQ4B016), 2010 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (ZSQ10016), 2010 国家社会科学基金项目 (10BMZ046), 2009 中南民族大学教学研究项目 (JYX09022)。

作者简介: 刘驰, 辽宁铁岭人, 讲师, 博士生。研究方向: 人口资源与环境经济学。

陈祖海, 湖北潜江人, 教授, 博士。研究方向: 环境经济学。

了实证研究。

经济发展和环境之间的关系早已成为国内外学者研究的焦点之一。一种观点认为经济发展会对环境产生压力,因此必须加强环境保护,以保证环境与经济的平衡发展^[2-4];另一种观点认为经济发展本身就是环境保护的有效手段,随着经济的增长,产业结构的调整,依赖资源和产生环境污染的产品需求减少,可以达到环境改善的目的^[5]。最具代表性的是 Grossman 和 Krueger 发现的环境质量随着经济的增长呈现先增长后减小的关系,也被称为环境库兹涅茨曲线,简称 EKC^[1]。国内学者进行了一些实证研究:凌亢等^[13]计算了经济规模、产业结构和排污强度对全国和南京“三废”的影响;胡明秀等^[14]计算了人均 GDP 与工业“三废”之间的相关关系;于峰^[15]等计算了各省经济发展对环境质量的影响等,大多考察了经济指标对环境指标的影响。

虽然城市发展水平与经济发展水平密切相关,但城市化进程对环境的影响与单纯的经济指标所反映的情况是不一样的。为此,本文以武汉市为研究对象,借鉴国内外运用复合指标测度城市化水平的相关研究,运用因子分析法对武汉市城市发展水平进行重新测定,依据相关统计数据计算出武汉的城市发展综合指数,探究城市化进程对城市环境的影响,为实现城市化与环境的协调发展提供参考。

1 研究对象及研究方法

1.1 研究地区概述

武汉市是湖北省省会城市,也是中部六省人口规模最大的城市,拥有完整的工业体系,2009 年常住人口 910 万,户籍人口 838 万人。武汉市 2010 年经济总量达到 5 515.76 亿元,GDP 总量在中部六省省会城市中名列第一^①。近年来,武汉市城市发展显著加快,城市工业、人口的高度集中,使得固体废弃物污染、水污染、空气污染等问题加剧。以水污染为例,据武汉市环保局公布,2010 年,全市废水排放量 78 376.66 万 t,其中工业废水 22 465.15 万 t,占废水排放总量的 28.66%;生活污水 55 911.52 万 t,占废水排放量的 71.34%,生活污水排放量仍超过工业废水排放量^②。近 20 年来武汉市废水排放情况如图 1 所示。

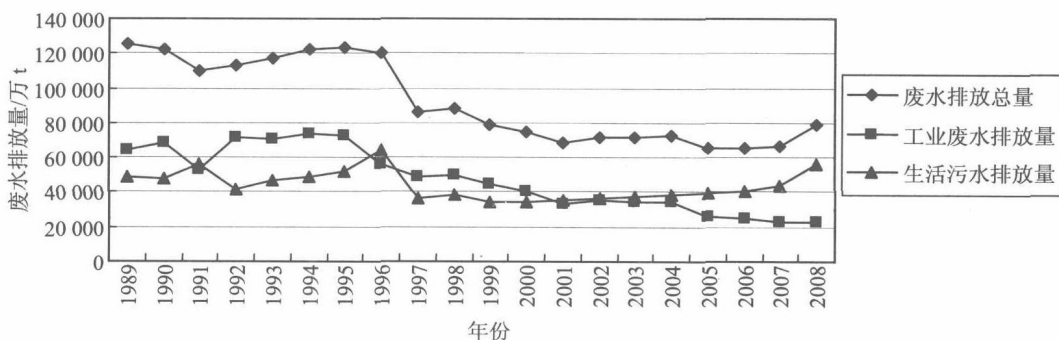


图 1 1989—2008 年武汉市废水排放量趋势图

① <http://www.whhj.gov.cn/Article/ShowArticle.aspx?id=6217> 《2010 年武汉市国民经济和社会发展统计公报》。

② <http://news.163.com/11/0318/03/6VD8UA5900014AED.html> 《2010 年武汉市环境状况公报》。

1.2 研究方法

1.2.1 因子分析法

因子分析是处理多变量数据的一种统计分析方法,能够有效地消除指标之间多重共线性的影响。其基本思想是以最少的信息丢失把众多的原始变量浓缩成少数的几个相互独立的综合因子变量,用它们来概括和解释具有错综复杂关系的大量的观测事实,从而建立起最简洁、最基本的概念系统,揭示出事物之间最本质的联系,然后以此为依据进行下面的分析。本文选用因子分析中的主成分分析法,构建城市发展综合指数。

因子分析法的主要步骤为:① 变量选择和相关矩阵的计算;② 因子的提取;③ 累积方差贡献率的确定;④ 确定因子的数量:一般按照特征值大于 1 以及累积贡献率(即主成分解释的方差占总体方差的比例)大于 85% 的原则提取主成分因子;⑤ 对主成分因子的经济意义作解释,一般由权重较大的几个指标的综合意义来确定;⑥ 确定各因子得分并计算综合得分。在具体使用因子分析时,步骤二和三相互决定,是很难分开的。

1.2.2 回归分析法

回归分析法是最灵活和最常用的统计方法之一,它用于分析一个因变量与一个或多个自变量间的关系。回归分析主要用于研究因果关系,如因变量 Y 和自变量 X , 它们的因果关系可以表示为 $Y=f(X)$, 反映 X 对 Y 的影响。本文用城市综合发展指数分别与“三废”进行回归分析。

回归分析法的主要步骤为:① 建模,根据观察值的散点图判断因变量和自变量之间是否有一定关系;② 估计回归函数,确定回归直线或曲线的走向,使其尽可能拟合观察点分布;③ 检验回归函数,回归系数,检验显著水平。

2 综合城市发展水平的测定

2.1 指标体系的构建

城市发展是一个复杂的动态变化过程,影响因素较多,它不仅体现了一个地区人口性质的变化,还体现出该地区的经济发展水平、产业结构以及人民的生活质量。本文从城市化的多个角度出发,采用复合指标法衡量城市发展水平。根据可操作性、针对性、层次性和系统性等评价原则,综合其他学者的研究成果^[8-12, 16],我们认为一个地区的城市发展水平主要由本地区的人口因素、经济水平、产业结构、生活水平、基础设施建设等方面综合反映。因此,本文从上述 5 个方面,选取 12 个相关指标进行分析,构建武汉市城市发展评价体系。其中人口因素对应的指标为: X_1 ——年末总人口数、 X_2 ——非农人口占总人口比重;经济水平对应的指标为: X_3 ——武汉市人均 GDP、 X_4 ——国民生产总值;产业结构对应的指标为: X_5 ——第二产业占 GDP 的比重、 X_6 ——第三产业占 GDP 的比重、 X_7 ——重工业比重、 X_8 ——万元工业总产值能源消费量;生活水平的指标为: X_9 ——居民人均消费支出、 X_{10} ——城镇居民人均可支配收入;基础设施建设的指标为: X_{11} ——人均道路面积、 X_{12} ——人均住房面积。

2.2 武汉市城市发展参数

运用 SPSS17.0 软件对武汉市 1989—2008 年的相关统计数据进行无量纲化处理。为了确保该指标体系的科学性,首先对各指标因子进行相关性统计分析,由相关系数矩阵可以看出,12 个指标变量之间存在很强的相关关系(即存在共线性),可以解释为上述指标在反映研究

信息时有一定的重叠,所以可以用因子分析法对 12 个指标进行降维处理。KMO 和 Bartlett 球度检验结果: KMO=0.813, Bartlett 检验近似卡方为 680.553, $df=66$, Sig.=0.000。上述结果显示该组变量适合进行因子分析,而且分析效果较好,上述每个指标的抽取比例均在 81.6%以上。

表 1 解释的总方差

成分	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%
1	10.101	84.171	84.171	10.101	84.171	84.171	6.683	55.688	55.688
2	1.354	11.283	95.454	1.354	11.283	95.454	4.772	39.766	95.454

注:提取方法为主成分分析。

通过分析,得到各个主成分因子的特征根、贡献率和累积贡献率及经正交旋转后的旋转平方和载入(表 1)。由表 1 可知,提取的前两项主成分因子的累积贡献率已高达 95.454%,按照累计贡献率大于 85%,特征值大于 1 的原则,只需求出第一、第二主成分 Z_1 、 Z_2 即可。前两个因子变量综合蕴涵了原始数据 12 个评价指标所表达的足够信息。特别是第一主成分因子的特征值为 10.101,该因子的解释力度达到 84.171%。

表 2 因子载荷矩阵及旋转因子载荷矩阵

	因子载荷		旋转因子载荷	
	Component		Component	
	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2
X_1	0.998	-0.026	0.762	0.644
X_2	0.978	0.132	0.846	0.508
X_3	0.976	0.148	0.854	0.495
X_4	0.967	0.192	0.875	0.455
X_5	-0.674	0.702	-0.087	-0.969
X_6	0.856	-0.487	0.364	0.915
X_7	0.615	0.661	0.893	-0.132
X_8	-0.950	0.250	-0.585	-0.789
X_9	0.994	-0.002	0.775	0.623
X_{10}	0.986	0.122	0.845	0.521
X_{11}	0.918	0.181	0.830	0.432
X_{12}	0.995	0.003	0.779	0.620

注:提取方法为主成分分析法。a.已提取了两个主成分。

旋转法为具有 Kaiser 标准化的正交旋转法。b.旋转在 3 次迭代后收敛。

从表 2 可以看出,第一主成分因子分别对人口因素指标: X_1 ——年末总人口数、 X_2 ——非农人口占总人口比重;经济水平指标: X_3 ——武汉市人均 GDP、 X_4 ——国民生产总值;

产业结构指标: X_8 ——万元工业总产值能源消费量; 生活水平指标: X_9 ——居民人均消费支出, X_{10} ——城镇居民人均可支配收入; 基础设施建设指标: X_{11} ——人均道路面积, X_{12} ——人均住房面积等的载荷系数的绝对值均大于 0.9, 说明该因子与上述各变量关系接近, 第一主成分因子在一定程度上代表了城市发展的综合水平, 因此 Z_1 命名为经济社会因子, 也称城市发展因子。

为了对每个公因子寻找适当的解释, 实施方差极大值正交旋转, 得出旋转因子载荷矩阵 (表 2)。两个主成分因子的方差贡献率分别为 55.688%、39.766%, 累积方差贡献率为 95.454%。从表 2 可以看出, 第二个主成分因子对产业结构指标: X_5 ——第二产业占 GDP 的比重、 X_6 ——第三产业占 GDP 的比重的载荷系数的绝对值大于 0.9, 说明该因子与产业结构有较大的相关性, 在一定程度上代表了城市产业结构水平。因此 Z_2 命名为产业结构因子, 也称工业化因子。在表 1、表 2 基础上, 可计算出 Z_1 、 Z_2 在各年份上的得分。再按照两个主成分的贡献率就可以得出综合主成分 Z 在各年份上的得分, 即城市发展综合指数, 结果见表 3。

表 3 城市发展各项因子的主成分得分

年份	因子得分		总得分
	Z_1	Z_2	Z
1989	-0.063 36	-2.428 24	-1.00
1990	-0.546 17	-1.517 45	-0.91
1991	-0.931 45	-0.622 28	-0.77
1992	-0.710 72	-0.747 55	-0.69
1993	-0.183 24	-1.153 74	-0.56
1994	-0.298 22	-0.838 75	-0.50
1995	-0.385 03	-0.448 6	-0.39
1996	-0.579 97	0.087 07	-0.29
1997	-0.536 93	0.217 34	-0.21
1998	-0.790 51	0.756 92	-0.14
1999	-0.865 63	0.999 06	-0.08
2000	-0.709 99	1.026 42	0.01
2001	-0.604 53	1.111 96	0.11
2002	-0.268 44	1.063 22	0.27
2003	-0.094 59	1.187 94	0.42
2004	0.192 46	1.060 83	0.53
2005	1.433 59	0.004 05	0.80
2006	1.697 42	-0.006 69	0.94
2007	1.877 68	0.175 32	1.12
2008	2.367 62	0.073 25	1.35

3 城市发展对城市环境的影响

3.1 相关分析

构建了城市发展综合指数之后,我们就城市发展水平对城市环境的影响进行分析。本文选取最能反映城市环境质量的废水排放总量、废气排放量和工业固体废弃物排放量(俗称“三废”)作为环境指标,选取上面分析中的城市发展总得分,即城市发展综合指数作为城市发展指标。依据武汉市 1989—2008 年相关数据,运用 SPSS17.0,对城市发展综合指数和“三废”进行相关分析。结果显示:城市发展综合指数与废水排放总量,废气排放总量,工业固体废弃物的相关系数分别为 -0.830 , 0.971 , 0.879 ,而且 $\text{Sig.}=0.000$ 所选取的环境指标均在 0.01 水平上与城市发展综合指数存在极显著相关关系。因此,建立城市发展综合指数与“三废”环境指标之间的计量模型具有一定的解释意义。

3.2 模型建构及结果分析

借助 SPSS17.0 软件系统分别进行多种曲线回归模拟,结果发现 3 次回归曲线较能全面反映城市发展综合指数与“三废”排放量之间关系,以城市发展综合指数为自变量(X),以典型环境“三废”为因变量(Y),分别建立曲线模型,趋势见图 2。

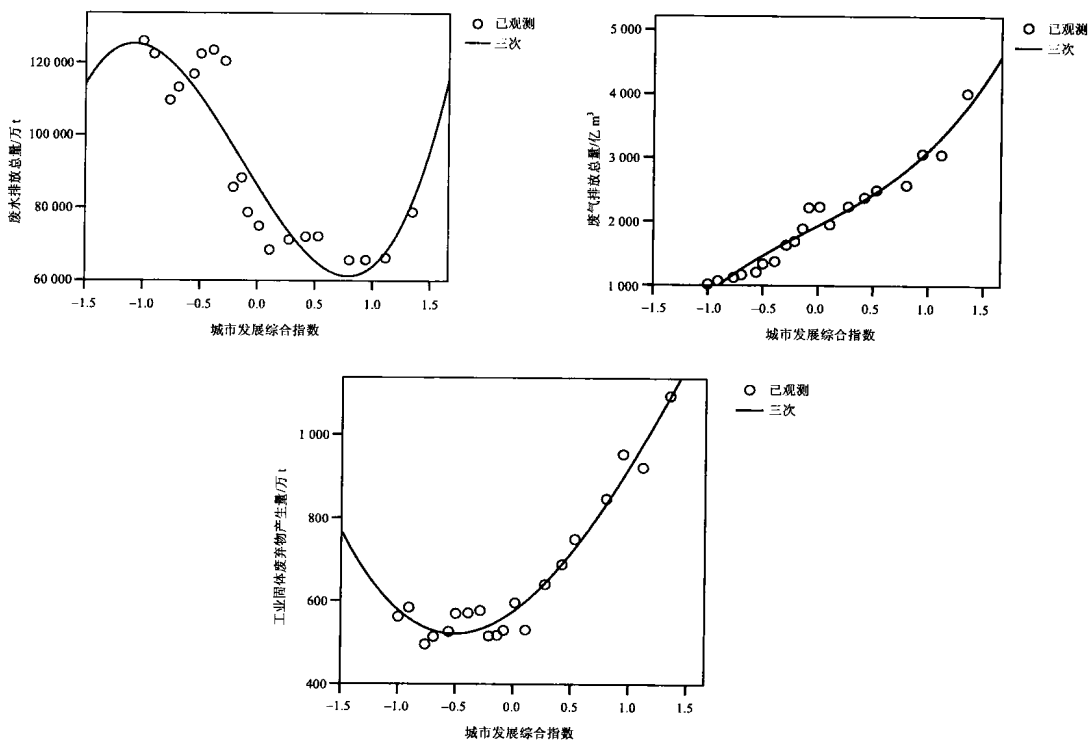


图2 城市发展综合指数与“三废”排放总量的3次回归曲线

3.2.1 城市发展综合指数与废水排放总量

城市发展综合指数与废水排放总量 3 次多项式曲线模型检验效果: $R^2=0.845$,表明模型有较高的拟合优度,而且 $F=29.012$, $\text{Sig.}=0.000$,小于 0.01 ,说明城市发展综合指数对

与废水排放量的影响是显著的^①。趋势模型如下：

$$Y = 19\,649.729X^3 + 8\,514.082X^2 - 50\,185.313X + 85\,877.745$$

由此模型可以看出，近 20 年，武汉市城市化水平与废水排放量呈现“N”形关系。第一阶段，从 1989 年开始，废水排放总量比较高，且随着城市发展水平的提高继续上升。这一阶段反映了环境与经济增长初级阶段之间的一般关系。第二阶段，城市发展达到一定水平后，废水排放量随着城市发展水平提高而降低，城市发展综合指数为 0.8 时（2005 年），废水排放总量最低。这是由于城市化进程中，工业化程度提高，产业结构升级和节能减排技术提高。第三阶段，城市发展水平再提高到一定阶段后，废水排放量又会随着城市发展水平的提高而增加。这一阶段的上升主要是由生活废水排放量的增加引起的（图 1）。随着城市非农人口的增加，城市生活污水排放量大增，从 2001 年开始超过了工业废水排放量。一方面城市非农人口受教育程度越来越高，对卫生条件的要求越来越高，如洗澡、洗涤用水量提高，从而增加生活废水的排放；另一方面城市非农人口的居住条件差，居住分散，使得生活废水排放分散，处理程度低。在这一阶段，产业结构升级的空间有限，工业节能减排技术的边际贡献率不大，工业废水排放减少的速度远不及生活废水增加的速度，所以总废水量呈上升趋势。所以，今后要降低废水排放总量必须降低生活废水排放量。

3.2.2 城市发展综合指数与废气排放总量

城市发展综合指数与废气排放总量 3 次多项式曲线模型检验效果： $R^2=0.955$ ，表明模型有较高的拟合优度，而且 $F=113.069$ ， $\text{Sig.}=0.000$ ，小于 0.01，说明城市发展综合指数对与废气排放量的影响是显著的。趋势模型如下：

$$Y = 218.79X^3 + 55.491X^2 + 907.661X + 1931.270$$

由此模型可以看出，随着城市发展水平的提高，废气排放总量是逐渐增加，其曲线处于环境库兹涅茨曲线左侧，转折点还没有出现。武汉是工业城市，以煤炭为主的能源结构是造成城市空气污染的主要因素。煤炭燃烧排放的二氧化硫、氮氧化物、烟尘等给城市空气带来严重的污染。据统计，2010 年，武汉市工业废气排放总量 4 720.80 亿 m^3 ，较上年增加 420.93 亿 m^3 。不过，二氧化硫排放总量 9.28 万 t，较上年下降 22.75%。

3.2.3 城市发展综合指数与工业固体废弃物

城市发展综合指数与工业固体废弃物 3 次多项式曲线模型检验效果： $R^2=0.958$ ，表明模型有较高的拟合优度，而且 $F=121.444$ ， $\text{Sig.}=0.000$ ，小于 0.01，说明城市发展综合指数对于工业固体废弃物的影响是显著的。趋势模型如下：

$$Y = -31.260X^3 + 174.898X^2 + 203.793X + 575.397$$

由此模型可以看出，其曲线特征呈“U”形，随着城市发展水平的提高，工业固体废弃物排放量先下降，后上升。在城市发展综合指数为 -0.5 左右（即 1995 年前后），工业固体废弃物排放量最低，之后开始上升。随着城市化进程的加快，工业固体废弃物的产生量还会保持高速增长。城市固体废弃物产生量大，增长速度快，但对固体废物的处置能力

① 由于 1989 年和 1990 年废水排放总量数据缺失，笔者用 SPSS17.0 进行趋势替代处理。